ChinaXiv合作期刊

CN 53-1189/P ISSN 1672-7673

VLBI 数据记录系统 Mark6 及相关技术研究进展*

郭绍光，朱人杰，郑为民，范庆元，李纪云，赵融冰，
张秀忠，徐志骏，甘江英，吴亚军
（中国科学院上海天文台，上海 200030）

摘要：随着数据记录速率的提高以及对数据准确性的要求，老的采集系统已经不能满足新的要求，迫切要求采用新的终端和技术。Mark6 是麻省理工学院研制的最新的记录终端，已经用于主要的天文机构，比如 JIVE、KASI、Max-Planck-Institute 等。首先介绍了 VLBI 数据记录终端的现状，给出了上海天文台对 Mark6 软硬件的调试与配置；然后介绍了使用 Mark6 与 CDAS2 互连进行数据记录的测试及分析；最后对 Mark6 系统的应用及相关软件的后续研发进行了简洁阐述。可为后续终端采集系统的安装、配置及升级提供指导及参考。

关键词：Mark6；终端系统；数据记录；射电技术；甚长基线干涉测量
中图分类号：P11 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2017)03-0281-07

甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry，VLBI)是 20 世纪 60 年代后期发展起来的射电干涉新技术。独立本振以及信号记录设备的应用使得角分辨率得到提高，是现代天文观测中角分辨率最高的观测技术之一[1-3]。

为了适应不断提高的数据速率、不断增加的记录带宽、大数据量以及数字基带转换器各种观测模式的需求，新记录终端的需求迫在眉睫。例如，在大地测量学中，下一代的甚长基线干涉测量全球观测系统(VLBI2010 Global Observing Syste，VGOS)，希望在全球尺度上达到 1 mm 的定位精度，系统使用可以快速旋转的 12 m 灵敏小天线，并且所需带宽达到了 4 GHz[4]。天文学中视界望远镜(Event Horizon Telescope，EHT)工作在毫米波段，角分辨率达到 20 μas，考虑到大气相干对观测幅度值的影响，在短时间内获得足够的灵敏度也需要 4 GHz 的带宽[5]。两者目前的计划记录速率都是 16 Gbps/台站，未来可能有更高记录速率的需求[4-5]。

Mark6 数据采集和记录系统是为了满足日益增加的甚长基线干涉测量灵敏度研发的，遵循高速存储、容易维护的原则，Mark6 系统具有 16 Gbps 的稳定记录速率，支持通用的甚长基线干涉测量数据格式，并且可以从原来老的 Mark5 系列数据采集记录系统平稳过度升级。

目前主要的天文数据处理机构已经将终端更新到了主流的 Mark6[6]。上海天文台也已经配置了 Mark6 系统，并与上海天文台第 2 代数据采集系统[7](Chinese Data Acquisition System 2，CDAS2)进行了最新的数据采集记录测试实验。

1 甚长基线干涉测量数据采集系统简介

数据终端采集系统是甚长基线干涉测量系统的重要部分，它支持的数据采集、数据编码、记录速率、记录模式、数据连续性等，将直接影响后续的相关处理。

美国国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory，NRAO)于 1967 年研制了 Mark1，经过 50 年不断的更新和快速发展，目前已经研发升级到 Mark6 系统，其中的记录媒介也从一开始的磁带记录转

* 基金项目：国家自然科学基金（11403081，11303075，11503069，11403082，11173051，U1531116）资助.
收稿日期：2016-09-20；修订日期：2016-09-29
作者简介：郭绍光，男，硕士. 研究方向：VLBI 技术、相关处理及终端存储. Email：sgguo@shao.ac.cn

chinaXiv:201711.01313v1

ChinaXiv合作期刊

换到硬盘记录，并展开了相应的 e-VLBI 研究[8]。

数据记录媒介从磁带(Mark1，Mark2，Mark3)转移到硬盘(从 Mark4 系统开始)，这主要得益于硬盘价格的下降、容量的增加以及硬盘相比于磁带的诸多优点，比如记录/回放数据质量高，几乎没有误码，不会有磁头磨损问题等[9]。

到目前为止各类终端的系统性能及使用年份信息见表 1。

表 1 各类终端的信息[10]

Tabel 1 The information of different terminals

型号	使用年份	记录速率	记录介质
Mark 1	1978	1 Mbps	计算机磁带
Mark 2	1981	4 Mbps	录像带
Mark 3	1986	112 Mbps	视频磁带
Mark 3B	1994	112 Mbps	视频磁带
VLBA4	2000	1 Gbps	薄视频磁带
Mark 5A	2004	1 Gbps/512 Mbps	硬盘/磁带
Mark 5B	2006	1 Gbps	硬盘
Mark 5B+	2006	2 Gbps	硬盘
Mark 5C	2010	4 Gbps	硬盘
Mark 6	2013	16 Gbps	硬盘
CVN 阵列	2016	8 Gbps	硬盘

中国 VLBI 网(Chinese VLBI Network，CVN)由上海 25 m、佘山 65 m、密云 50 m、昆明 40 m 及新疆 25 m 望远镜组成[11]，作为我国探月工程测控系统的甚长基线干涉测量测轨分系统，提供了嫦娥卫星的精确角位置信息，与我国航天测控网一起圆满完成了相应的测轨任务[12]。

中国 VLBI 网目前的终端系统由上海天文台自行研制的数据采集系统(Chinese Data Acquisition System，CDAS)和数据采集记录系统 Mark5B 组成。Mark6 系统相较于 Mark5 系统，在以下方面做出了改进：增加了记录数据率，将硬件全部更改为商用产品(Commercial Off The Shelf，COTS)，软件全部开源[13-14]。

2 Mark6 数据采集记录系统

Mark6 系统起初是专门为甚长基线干涉测量优化的基于磁盘的数据获取和记录系统。作为 Mark5 系列的下一代产品，Mark6 将稳定的记录速率提高到了 16 Gbps。Mark6 相对于原来的产品最大的区别在于使用了商用产品并开源相应的软件。

2.1 设计原则

作为基于磁盘技术的最新一代高数据速率的甚长基线干涉测量数据记录与回放系统，Mark6 在设计之初坚持两个原则[6]，一是主要原则，在硬件完成的基础上必须实现；二是扩展原则，在条件允许的情况下考虑实现。

目前测试使用的 Mark6 已经完成了主要的设计目标，主要目标如下：

(1)16 Gbps 持续稳定的记录能力：在 4 个硬盘模组全部在线的情况下，保持该速率进行持续记录；

(2)支持通用的甚长基线干涉测量数据格式：目前支持天文通用的 Mark5B 和 VDIF 数据格式；

(3)尽可能使用商用产品：数据传输使用 Conduct 公司设计的底板[15]；

(4)开源软件：在 Debian 系统上可以查看安装的所有源码及相应的程序；

(5)价格相对便宜：不包括硬盘的 Mark6，价格在 2 万美元左右；

(6)保持对 Mark5 的硬件投资：从 Mark5 可以平稳过度到 Mark6，以保留对 Mark5 的硬件研发投资，可以通过购买升级配件，将 Mark5B 升级到 Mark6。

2.2 硬件设计

Mark6 主要由商用部件组成，其主底盘机架内含有计算机主板、硬盘；机架后面板有外接显示器、键盘、鼠标、SFP+网卡、千兆网卡等接口。

Mark6 的硬件如图 1 和图 2，由 5 U 的主底盘(图中数字 1、2 标示)、1 U 的线缆控制面板和 5 U 的扩展底盘(图中数字 3、4 标示)组成，共占用空间 11 U。

通过标记的数字可以知道，模组 1、2、3、4 在线缆控制面板的顺序为 1、3、2、4，这也对应了前后面板的连接线顺序。

Mark6 的前面板如图 1，包括 4 个硬盘模组(含 1、2 主模块组以及 3、4 扩展模块组)、一个 1 U

chinaXiv:201711.01313v1

ChinaXiv合作期刊

的线缆挡板以及 4 对 SAS 连接线，其中每对 SAS 负责一个硬盘模组的高速数据传输采集，后面板如图 2，包括 4 个万兆光模块(用于 10 G 网络数据的采集)、2 个千兆光模块(其中一个用于对 Mark6 的控制，另外一个保留)、及 4 对 SAS 线接口(用于连接前面板的硬盘模组)。其中通信控制接口位于最左端的 1 G 以太网接口 eth0，右端与之相邻的 eth1 目前保留不用。外接显示器的视频图形阵列(Video Graphics Array，VGA)插槽右边有 2 个网络接口卡(Network Interface Cards，NIC)。每个网络接口卡都有 2 个 10 G 的 SFP+光纤模块(10 Gigabit Small Form Factor Pluggable，SFP+)，对应的接口分别为：eth2、eth3、eth4、eth5，各自的默认 IP 为 192. 168. 1. 2-5。



图 1　Mark6 前面板

Fig. 1　Mark6 front panel



图 2　Mark6 后面板

Fig. 2　Mark6 back panel

2. 2. 1　硬件连线示意图

考虑到不同型号的 Mark6 有不同的接口规则，针对 Mark6 主底盘型号为 4023 及以后的版本，硬件的连线示意图如图 3，连接时需要特别注意硬盘模组的位置与线缆控制面板的连接顺序以及连接中的 SAS 线的顺序，其中前面板示意图上的颜色对应后面板的颜色接口。图 4 中 4 个万兆光模块 eth2～eth5 主要用于 10 G 网络数据的接收，千兆光模块 eth0 用于对 Mark6 的通讯控制，4 对 SAS 线接口为光模块到硬盘模组的数据传输接口。

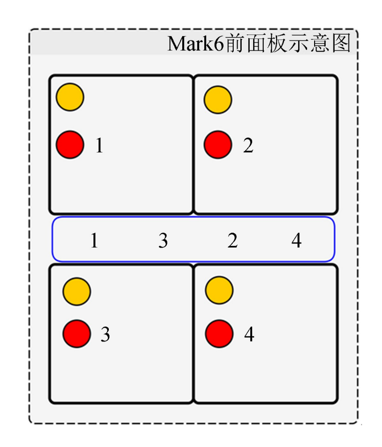


图 3　Mark6 前面板示意图

Fig. 3　Mark6 front panel diagram

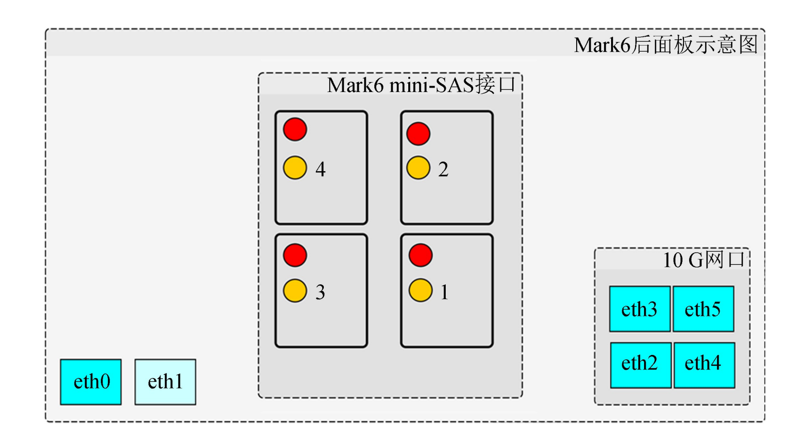


图 4　Mark6 后面板示意图

Fig. 4　Mark6 back panel diagram

2. 3　软件设计

Mark6 的操作系统采用通用的 Debian 发行版系统[16]，该系统非常稳定，内核和内存的占用非常小，使用的软件都是经过测试的稳定版本，特别适合用做服务器操作系统。

Mark6 的软件设计使用分层的概念模型，Mark6 软件模组化顶层设计，主要展示了软件设计的两个主要软件模组，即 cplane 和 dplane，其中的 10 MB 数据块为每次缓存的存储量如图 5。软件主要包

chinaXiv:201711.01313v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201711.01313v1

含 cplane、dplane 和 da-client 3 个组件，其中与用户交互的称为 cplane，与网络和磁盘硬件交互的称为 dplane。cplane 和 dplane 通过 UDP 协议通信。

2.3.1 cplane

cplane 为用户提供了一个接口，并完成了一系列不同的高层次监控和控制。考虑到 cplane 的复杂性、易用性及可实现性，使用 Python 语言实现。用户的接口采用标准 VSI-S 协议[17]，该协议增加了对 Mark6 系统的指令集。cplane 同时也负责管理磁盘模组，诸如挂载、卸载并绑定不同的磁盘到一个虚拟磁盘模组，最多支持 32 个磁盘的管理。

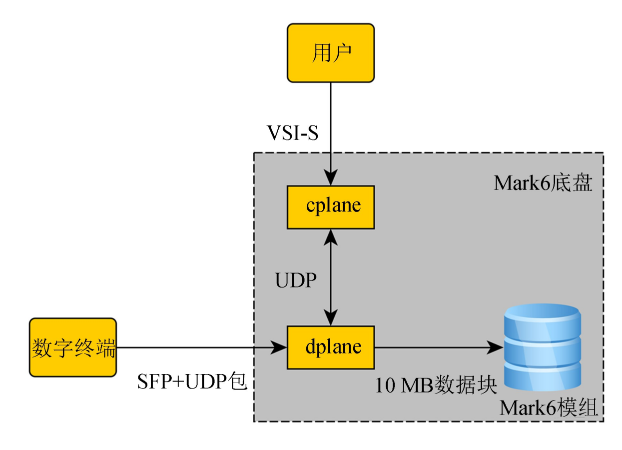


图 5 Mark6 软件设计图

Fig. 5 Mark6 software design

2.3.2 dplane

dplane 负责所有与高速数据流相关的任务。dplane 从 10 G 网卡读取数据，首先放入一个容量为 56 GB 的随机存取存储器(Random-Access Memory，ARM)大的缓存区中，然后写入多个磁盘的文件中。数据的起始时间通过读取数据包的数据帧并解码帧头信息精确控制。

由于 10 G 网卡需要达到 4 Gbps 的记录速率(非爆发模式下)，考虑到 dplane 对高速处理的需求，使用 C 编写，并将代码进行了高度优化。

程序 dplane 采用多线程编程，针对每个输入流将单独分配一个线程资源，其中分配的缓存为全部 64 GB 物理内存的 56 GB，占比达到 87.5%。

3 与 CDAS2 联调测试

Mark6 的输入为 10 G 网络数据，此处采用上海天文台自行研制的第 2 代数据采集系统，输入的数据格式为 VDIF，每台 CDAS2 输入速率为 4 Gbps。

测试中，使用 4 台 CDAS2 系统分别连接 Mark6 系统提供的 4 个 10 G 光模块，记录的数据保存在 Mark6 硬盘上，Mark6 与 CDAS2 的连接示意图如图 6。图 6 展示了记录速率为 16 Gbps 的示例，存储使用 32 块 SATA 硬盘，每块容量 6 TB，共 192 TB。

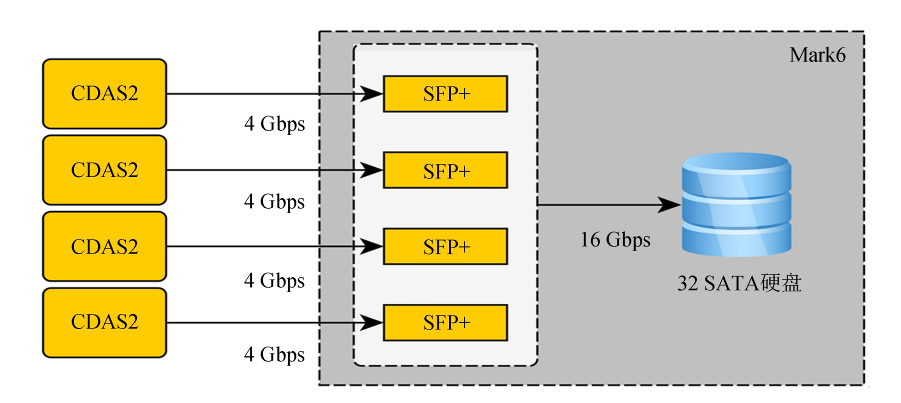


图 6 CDAS2 与 Mark6 互连示意图

Fig. 6 The connection of CDAS2 and Mark6

3.1 测试步骤

在对 Mark6 进行数据采集记录之前，首先需要对输入源进行设置，实验中使用 CDAS2，带宽可以设置 100 KHz～32 MHz，支持 16 通道，最高支持 16 bit 采样，详细的设置如图 7。该图为设置其中一台 CDAS2 系统，其中带宽为 8 MHz，8 通道，2 bits 采样。

ChinaXiv合作期刊

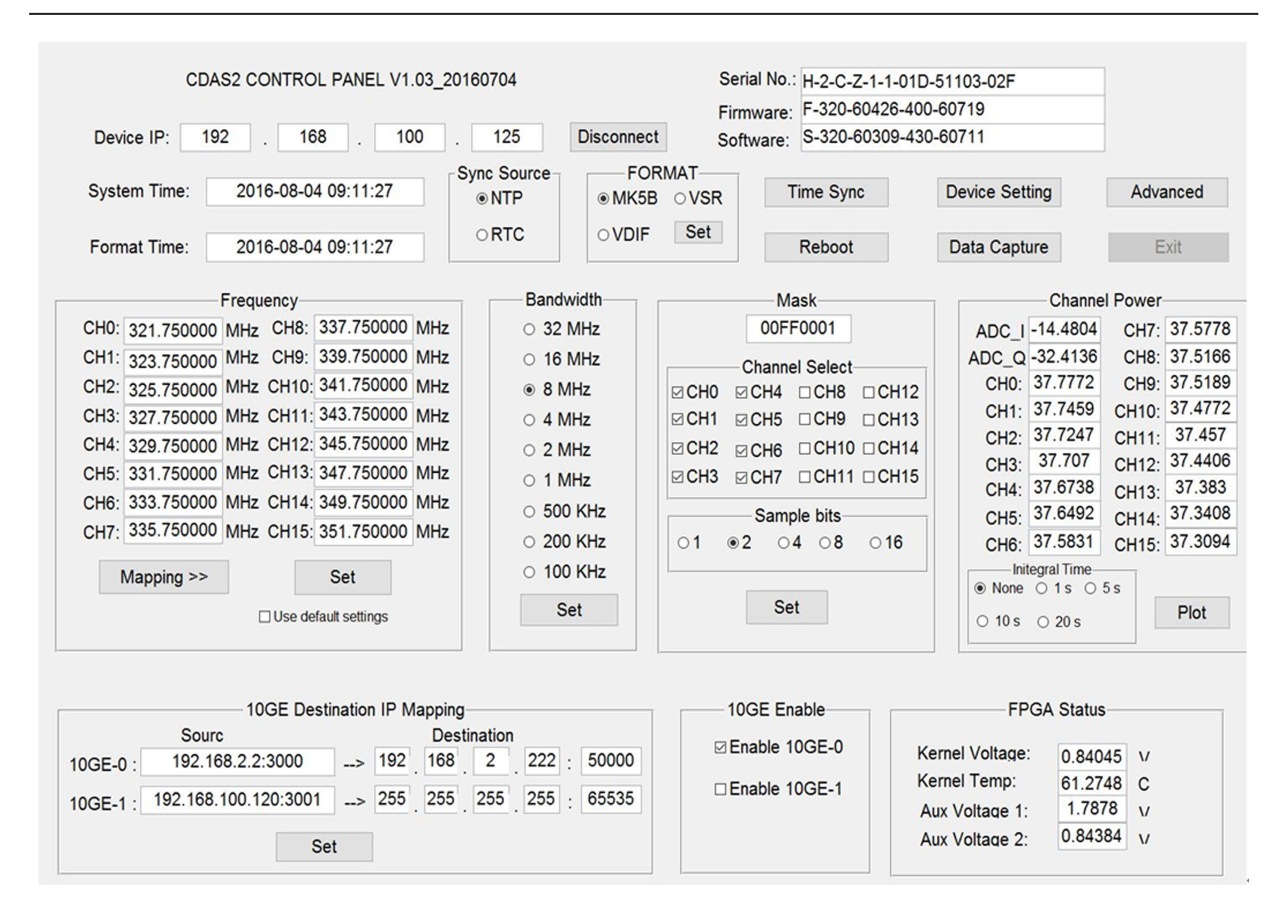


图 7　CDAS2 输入源设置

Fig. 7　CDAS2 input settings

Mark6 的采集记录流程与 Mark5B 不同，所有的记录操作在一个称为 da-client 的可交互程序里完成，da-client 通过接口协议与 cplane 和 dplane 进行通信。

具体的测试步骤如下：

(1)#初始化硬盘模组,分别为 4 组硬盘模组

(2)mod_init=1:8:SHAO_001:sg:new;

(3)mod_init=2:8:SHAO_002:sg:new;

(4)mod_init=3:8:SHAO_003:sg:new;

(5)mod_init=4:8:SHAO_004:sg:new;

(6)#建立虚拟硬盘组

(7)group=new:1234;

(8)group=open:1234;

(9)#设置输入数据流并提交

(10)input_stream=add:CDAS2:vdif:1032:42:0:eth2:192.168.100.61:12000;

(11)input_stream=commit;

(12)#开始记录,参数可配置

(13)record=on

3.2　测试结果分析

测试中，CDAS2 采用 Mark5B 格式器编码，输入数据记录系统 Mark6 中；Mark6 使用分散-收集(Scatter-Gather，SG)模式对输入数据进行记录保存，保存的数据包括 meta 数据与二进制数据，其中 meta 数据称为元数据，包含保存数据的各种信息，用于将分散的数据在聚合时提供参数。

chinaXiv:201711.01313v1

ChinaXiv合作期刊

图 8 为使用 CDAS2 与 Mark6 连接记录的 5 秒左右的 VDIF 格式数据，对该数据进行解帧头检验，横坐标为时间，纵坐标为秒内帧号，可以看到帧头信息联系，数据正确。

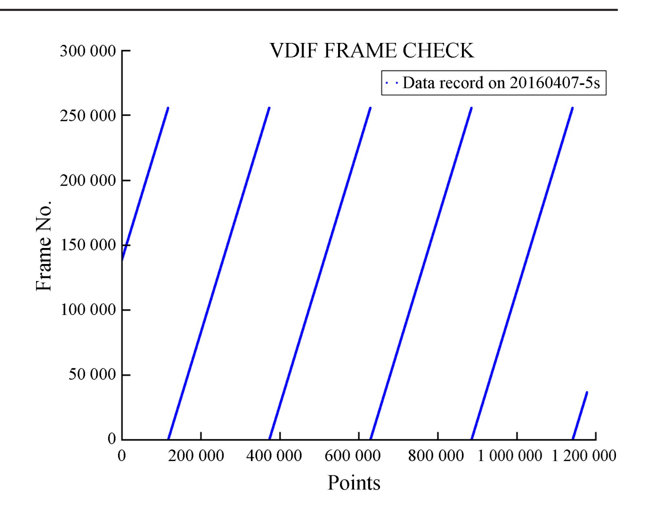


图 8 CDAS2 与 Mark6 联调测试结果

Fig. 8 Joint test result of CDAS2 and Mark6

4 总结与展望

为了应对 VLBI2010、毫米波甚长基线干涉测量及其他日益增加的宽带观测，Mark6 包括硬件和软件的研发还在更新升级，硬件的更新表现在后面板的设计布局在不断变化，包括对应的线缆插槽也可能更改，软件的升级表现在数据采集及更新中支持指令的扩充及参数更改，这也是 Mark6 在调试过程中容易出现问题的主要原因。所以，在调试时需要特别注意硬软件版本。

后续关于 Mark6 的测试，将考虑使用 ROACH 数字终端作为输入数据源，并将输出的数据使用上海天文台相关处理机或 DiFX 进行相关处理，并测试 32 Gbps 爆发模式的记录能力，以及对 e-VLBI 和回放的支持。

参考文献：

[1] Thompson A R, Moran J M, Jr G W S. Interferometry and synthesis in Radio Astronomy [M]. Wiley, 2001: 648-648.

[2] 钱志瀚. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.

[3] 林克雄. 甚长基线干涉测量技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1985.

[4] Petrachenko W, Behrend D, Hase H, et al. The VLBI2010 Global Observing System (VGOS) [C]. EGU General Assembly Conference, 2013.

[5] Doeleman S. Building an event horizon telescope: (sub) mm VLBI in the ALMA era [C/OL]. (2010) [2016-11-29]. https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi? confid=125.

[6] Whitney A, Lapsley D. Mark 6 Next-Generation VLBI Data System [C] // Behrend D, Baver K D. Seventh General Meeting (GM2012) of the international VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS). National Aeronautics and Space Administration, 2012: 86-90.

[7] 朱人杰, 张秀忠, 韦文仁, 等. 我国新一代 VLBI 数字基带转换器研制进展 [J]. 天文学进展, 2011, 29(2): 207-217.
Zhu Renjie, Zhang Xiuzhong, Wei Wenren, et al. The progress of modern Chinese Data Acquisition System [J]. Progress in Astronomy, 2011, 29(2): 207-217.

[8] 杨文军, 郝龙飞. VLBI 终端系统的发展历史和未来展望 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2012, 9(4): 374-381.
Yang Wenjun, Hao Longfei. Development history and future prospects of VLBI terminals [J]. Astronomical Research & Techonolgy——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2012, 9(4): 374-381.

[9] 韦文仁, 薛祝和. 基于磁盘的新型 VLBI 终端系统-MK5A 终端系统 [J]. 天文学进展, 2004, 22(3): 269-274.

chinaXiv:201711.01313v1

ChinaXiv合作期刊

Wei Wenren, Xue Zhuhe. The disk-based VLBI terminal system: MK5A terminal system [J]. Progress in Astronomy, 2004, 22(3): 269-274.

[10] 薛祝和, 王玲玲, 王锦清, 等. 上海天文台 MK5A 终端系统的安装与测试 [J]. 天文学进展, 2004, 22(4): 344-349.
Xue Zhuhe, Wang Lingling, Wang Jinqing, et al. The installation and testing of MK5A terminal at Shanghai Astronomical Observatory [J]. Progress in Astronomy, 2004, 22(4): 344-349.

[11] 洪晓瑜. VLBI 技术的发展和“嫦娥工程”中的应用 [J]. 自然杂志, 2007, 29(5): 297-299.
Hong Xiaoyu. VLBI techniques and application in the Chang′e lunar orbiter [J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(5): 297-299.

[12] 蒋栋荣, 洪晓瑜. 甚长基线干涉测量技术在深空导航中的应用 [J]. 科学: 上海, 2008, 60(1): 10-14.
Jiang Dongrong, Hong Xiaoyu. VLBI for deep-space navigation [J]. Science, 2008, 60(1): 10-14.

[13] Whitney A R, Beaudoin C J, Cappallo R J, et al. Demonstration of a broadband-RF VLBI system at 16 Gbps data rate per station [J/OL]. (2012) [2016-11-29]. https://www.researchgate.net/publication/232503776_Demonstration_of_a_broadband-RF_VLBI_system_at_16_Gbps_data_rate_perstation? ev=auth_pub.

[14] Whitney A R, Lapsley D E, Doeleman S S. Giga-bit/sec VLBI and e-VLBI [C]. American Astronomical Society Meeting. Bulletin of the American Astronomical Society, 2003, 35: 1209.

[15] Conduant′s multidrive recoder stores 16 Tbytes [R/OL]. (2008-05-55) [2016-11-29]. http://www. edn. com/design/test-and-measurement/4385900/Conduant-s-multidrive-recoder-stores-16-Tbytes.

[16] Hunger B M I. Debian GNU/Linux Bible [M]. Wiley, 2001.

[17] Whitney A. VLBI Standard Interface Specification [J/OL]. (2009-01) [2016-11-29]. https://www.researchgate.net/publication/265010140_VLBI_Standard_Interface_Specification.

The Progress of VLBI Data Acquisition System-Mark6 and Related Techenologies

Guo Shaoguang, Zhu Renjie, Zheng Weimin, Fan Qingyuan, Li Jiyun, Zhao Rongbing, Zhang Xiuzhong, Xu Zhijun, Gan Jiangying, Wu Yajun

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China, Email: sgguo@shao.ac.cn)

Abstract: With the improvement of the data recording rate and higher requirements to the accuracy of the data, the traditional acquisition system can not meet the new requirements, and it is urgent to use the new terminal and technology. Mark6 is the latest recording terminal that is currently developed by MIT. It has been used by the main astronomical institutions, such as JIVE, KASI, Max-Planck-Institute and so on. This paper first introduces the VLBI data acquisition terminal and provides the debugging and configuration of the hardware and software of Mark6 in Shanghai Astronomical Observatory; Then, the data recording test and analysis of the interconnection between Mark6 and CDAS2 are introduced; Finally, the application of Mark6 system and the subsequent research and development of related software are briefly described. This paper can provide guidance and reference for the installation, configuration and upgrade of the follow-up terminal acquisition systems.

Key words: Mark6; Terminal system; Data record; Radio technology; VLBI

chinaXiv:201711.01313v1